

文章编号:1001-7372(2015)06-0042-09

# RC桥墩弯剪破坏判别准则与抗震分析的改进模型

孙治国<sup>1</sup>, 李宏男<sup>1</sup>, 王东升<sup>2</sup>, 司炳君<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;

2. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**为进一步发展考虑非线性剪切效应的钢筋混凝土(RC)桥墩弯剪数值分析模型,分别基于修正的压力场理论(MCFT)和纤维梁柱单元模型计算了76个RC桥墩至极限荷载阶段时的剪切和弯曲变形,并根据两者之间的比值关系提出了桥墩弯曲-弯剪-剪切破坏模式的判别准则。根据桥墩破坏模式的不同,建立了桥墩弯剪数值分析的改进模型,以合理考虑桥墩弯曲与剪切变形间的耦合关系,并将模拟得到的桥墩滞回曲线与试验结果进行了对比。结果表明:桥墩剪切与弯曲变形的比值0.2和1.5可分别作为弯曲-弯剪-剪切破坏模式的判别标准,改进模型模拟得到的剪切及弯剪破坏RC桥墩滞回曲线与试验结果吻合良好。

**关键词:**桥梁工程;RC桥墩;弯剪数值分析;破坏类别;纤维梁柱单元模型;修正的压力场理论

**中图分类号:**U443.22

**文献标志码:**A

## Discrimination Criterion Governing Flexural-shear Failure Modes and Improved Seismic Analysis Model for RC Bridge Piers

SUN Zhi-guo<sup>1</sup>, LI Hong-nan<sup>1</sup>, WANG Dong-sheng<sup>2</sup>, SI Bing-jun<sup>1</sup>

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to further develop the flexural-shear numerical analysis model for reinforced concrete (RC) bridge piers with nonlinear shear effect considered, the shear and flexural deformations of 76 RC bridge piers under ultimate loads were calculated based on the modified compression field theory (MCFT) and fiber beam-column element model respectively. And a discrimination criterion governing flexural, flexural-shear or shear failure modes of RC bridge piers was proposed by the ratio between shear and flexural deformations. An improved flexural-shear numerical analysis model for bridge pier was established according to different failure modes of the piers, which could consider the coupling relation between flexural and shear deformations of the piers. The simulated hysteretic curves by the improved flexural-shear analysis model were compared with test results. The results show that the shear to flexural deformation ratio of 0.2 and 1.5 could be taken as the discrimination criterion governing flexural, flexural-shear, and shear failure modes of the piers. Also, the simulated hysteretic curves of the bridge piers with

收稿日期:2014-08-11

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2011CB013605);国家自然科学基金项目(51008041,51178071);中国博士后科学基金项目(2013M540226,2014T70250);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0751);辽宁省教育厅科学研究项目(L2014207)

**作者简介:**孙治国(1980-),男,山东德州人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:szg\_1999\_1999@163.com。

shear and flexural-shear failure modes by the improved analysis model agree well with test results.

**Key words:** bridge engineering; RC bridge pier; flexural-shear numerical analysis; failure mode; fiber beam-column element model; modified compression field theory (MCFT)

## 0 引言

剪跨比较小或配箍不足的钢筋混凝土(RC)桥墩在地震作用下易发生剪切或弯剪破坏。建立此类构件的抗震分析模型是把握全桥地震破坏机理的关键,也是桥梁抗震领域的研究热点。目前,基于纤维梁柱单元模型计算 RC 结构抗弯能力精度较好,在此基础上合理考虑试件非线性剪切变形是建立桥墩抗震分析模型需要解决的重要问题<sup>[1-3]</sup>。在此背景下,利用纤维梁柱单元模拟构件的非线性弯曲变形,并与非线性剪切变形叠加,共同考虑构件的弯剪变形耦合,是建立桥墩抗震弯剪数值分析模型的重要手段。Lee 等<sup>[4]</sup>以纤维梁柱单元程序 ZeusNL 为依托,利用纤维梁柱单元模拟桥墩的非线性弯曲变形,基于修正的压力场理论(Modified Compression Field Theory, MCFT)计算非线性剪切变形并通过弹簧单元模拟,建立了考虑桥墩地震弯剪变形耦合作用的串联模型,并在其后的数值分析中考虑了由于轴力变化引起的桥墩剪切刚度和强度的变化<sup>[5]</sup>,在其后 10 余年的时间里,串联模型在 RC 桥墩的弯剪数值分析中得以广泛的推广和应用<sup>[6-13]</sup>。

注意到串联模型的一个不足之处在于,模型中纤维梁柱单元与剪切弹簧单元极限荷载的较小值决定了整个试件的极限荷载,并且桥墩非线性变形主要发生在构件屈服及严重破坏阶段(对应试件极限荷载及极限荷载后的下降段),因此,串联模型要求对构件的破坏模式及抗弯与抗剪承载力作出准确判断,这是弯曲与剪切变形有效耦合的前提。Setzler 等<sup>[7-8]</sup>注意到了这个问题,并在其建立的分析模型中通过对比试件的抗弯和抗剪承载力判断墩柱可能的破坏模式,以此规定模型达到极限荷载后弯曲与剪切变形的耦合规则;但模型对抗剪承载力的计算采用的是基于试验结果统计分析的经验模型<sup>[14]</sup>,墩柱弯剪破坏模式判别的准确性不足。孙治国等<sup>[12]</sup>在其建立的桥墩弯剪数值分析模型中也注意到了此类问题,认为对于弯剪破坏的桥墩试件,应通过纤维梁柱单元模型确定剪切弹簧的极限荷载,但其未给出试件破坏模式判别的具体措施。近期,Elwood<sup>[6]</sup>、Ghannoum 等<sup>[11]</sup>基于 OpenSees 软件分别建立了

RC 框架柱的地震反应分析模型,模型均以串联模型为基础,所不同的是,为监测试件剪切破坏的发生,其分别定义了基于墩顶侧向变形和塑性铰区转角为破坏指标的破坏面,当试件侧向变形达到破坏面后,以剪切反应控制试件的非线性变形,但需要指出的是,试件破坏面的定义严重依赖于其所选择的弯剪破坏矩形框架柱试验结果,模型的适用范围受到了限制。

本文以 Lee 等<sup>[4]</sup>的串联模型为基础,基于试件剪切与弯曲变形的比值关系,提出了 RC 桥墩弯剪破坏模式的判别准则,在此基础上针对桥墩不同的破坏模式提出了相应的弯剪变形耦合建模策略,以合理考虑试件的弯曲与剪切变形及相互间的耦合问题,最终通过与试验结果的对比验证模型的准确性。

## 1 弯剪数值分析模型的基本框架

### 1.1 串联模型的建模思路及主要缺陷

借鉴 Lee 等<sup>[4]</sup>提出的 RC 墩柱串联模型的基本思路,如图 1 所示,模型中以纤维梁柱单元模拟桥墩的弯曲变形,试件的剪切变形通过模型底部的弹簧单元模拟,两者串联共同考虑桥墩的弯剪变形耦合作用。弹簧单元的剪力-剪切位移骨架曲线通过 MCFT 计算<sup>[15]</sup>,而剪力-剪切位移滞回关系则采用 Ozcebe 等<sup>[16]</sup>建议的剪切滞回模型。

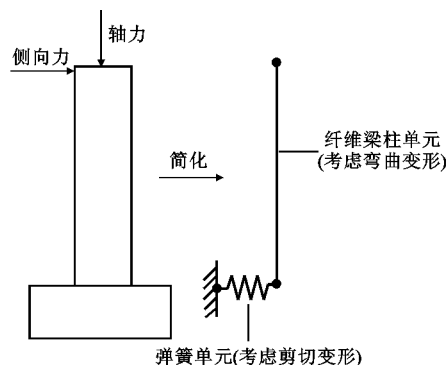


图 1 RC 桥墩弯剪数值分析模型

Fig.1 Flexural-shear Numerical Analysis Model for RC Bridge Pier

采用了基于柔度法的纤维梁柱单元模型考虑桥墩的受弯反应,混凝土受压应力-应变关系采用文献

[17]中建议的公式。采用 Menegotto-Pinto 模型<sup>[18]</sup>描述纵筋的本构关系。

RC 桥墩的弯剪变形耦合机理可通过图 2 进行说明,桥墩在轴力和侧向力(剪力  $V$ )作用下的剪切变形  $\Delta_s$ 。通过定义好的剪力-剪切位移骨架曲线和剪

切滞回规则描述,而在轴力和侧向力作用下的弯曲变形  $\Delta_f$  通过纤维梁柱单元模型计算。数值模型中剪切弹簧与纤维梁柱单元承受同样的剪力  $V$ ,分别计算剪切与弯曲变形并相互叠加,组成总的侧向变形  $\Delta$ 。

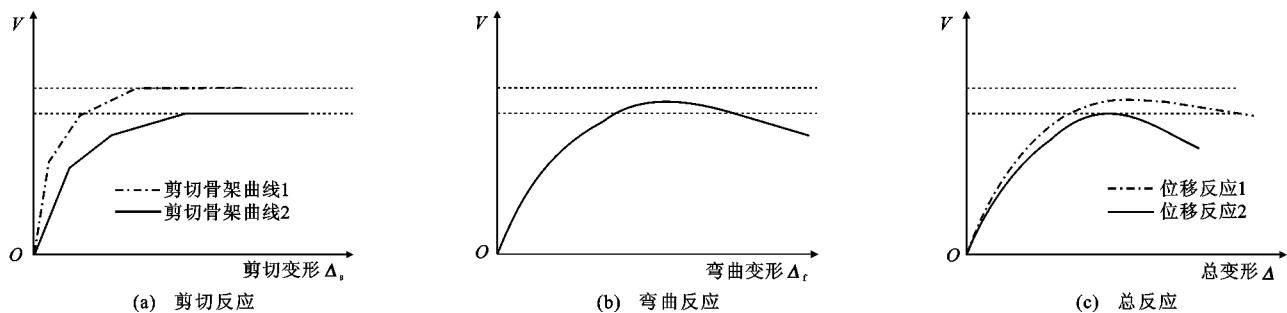


图 2 RC 桥墩弯剪变形耦合

Fig. 2 Coupling of Flexural and Shear Deformations for RC Bridge Pier

串联模型的不足也可通过图 2 进行说明,对弯曲破坏为主的桥墩试件,抗剪强度应高于弯曲破坏时对应的强度值,因此,应采用图 2(a)中的剪切骨架曲线 1 定义试件的抗剪行为,这样模型中总变形以弯曲变形为主,而剪切变形所占比例较小,总变形如图 2(c)中的位移反应 1 所示;反之,对剪切破坏为主的桥墩试件,则应采用图 2(a)中的剪切骨架曲线 2 定义试件的抗剪行为,此时模型中墩顶总变形将以剪切变形为主,弯曲变形所占比例较小,总变形如图 2(c)中的位移反应 2 所示。

实际上,无论发生何种破坏形态,MCFT 计算的桥墩极限荷载一般小于纤维梁柱单元模型计算的极限荷载,这就造成数值模型仅适用于剪切破坏为主的桥墩试件模拟。对于弯曲或弯剪破坏的 RC 构件,其极限荷载一般由抗弯承载力决定,这样数值模型中的弯曲变形将会非常小。模型过高估计了试件的剪切变形,且严重低估了弯曲变形,这与试验结果不符<sup>[4,12]</sup>。

## 1.2 桥墩弯剪破坏模式判别传统方法及其缺陷

针对串联模型的缺陷,合理判断桥墩在地震作用下可能的破坏模式是建立模型弯曲、剪切变形耦合准则的基础。RC 桥墩弯曲或剪切破坏模式判别传统方法是根据其抗弯与抗剪强度曲线进行对比,当抗剪强度曲线始终大于抗弯强度对应的剪力时,试件发生弯曲破坏,反之发生剪切破坏。

目前,纤维梁柱单元模型在估计桥墩抗弯能力时具有足够的精度,RC 桥墩弯剪破坏模式判别的主要困难在于试件抗剪强度曲线的准确估计,目前国内外对 RC 桥墩抗剪强度的研究尽管取得了若干

成果,但其误差较大<sup>[19-20]</sup>,不适用于本文弯剪数值分析模型的建立。

## 2 RC 桥墩弯剪破坏模式判别新准则

### 2.1 不同破坏模式下桥墩变形能力的比值

本文中,判断 RC 桥墩破坏模式的主要目的在于确定数值分析的串联模型中弯曲与剪切变形的耦合准则。试验结果表明,不同破坏模式下桥墩弯曲与剪切变形所占比例明显不同,对弯曲破坏桥墩,剪切变形所占总变形的比例明显小于剪切破坏桥墩试件。基于此,本文提出以剪切与弯曲变形的比值关系确定桥墩的破坏形态,并通过与试验结果的对比确定弯曲、弯剪、剪切破坏模式的划分界限,详细论述见下文。

为确定 RC 桥墩弯曲、弯剪或剪切破坏的划分界限,总结了国内外完成的 76 个 RC 桥墩抗震拟静力试验结果。试件来源为孙治国等<sup>[21]</sup>、Ranzo 等<sup>[22]</sup>、Zahn<sup>[23]</sup>完成的空心桥墩,司炳君等<sup>[24]</sup>、Ghee 等<sup>[25]</sup>、Lehman 等<sup>[26]</sup>、李贵乾<sup>[27]</sup>完成的圆形实心桥墩,以及孙治国等<sup>[28-29]</sup>、Tanaka<sup>[30]</sup>、Aboutaha 等<sup>[31]</sup>、Gill<sup>[32]</sup>、Watson 等<sup>[33]</sup>等完成的矩形实心桥墩抗震拟静力试验数据。从破坏形态可分为 33 个弯曲破坏、31 个弯剪破坏和 12 个剪切破坏试件。截面形式包括了 5 个空心桥墩和 71 个实心桥墩,其中:空心桥墩中包括 1 个矩形空心墩和 4 个圆形空心墩;实心桥墩中包括 46 个圆形截面和 25 个矩形截面试件。

MCFT 计算的桥墩  $V-\Delta_s$  关系曲线可简化为图 3 所示模式。一般来讲,MCFT 计算的 RC 桥墩剪

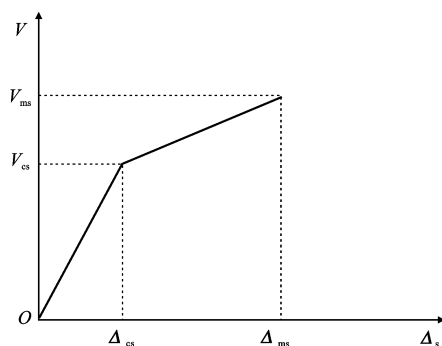


图 3 MCFT 计算的 RC 桥墩剪力-剪切位移关系

Fig. 3 Shear Force-shear Displacement Relationship of RC Bridge Pier Calculated by MCFT

力-剪切位移表现为明显的双线性,初始加载至剪切开裂点( $V_{cs}, \Delta_{cs}$ )时表现为弹性,剪切开裂点( $V_{cs}, \Delta_{cs}$ )至极限荷载点( $V_{ms}, \Delta_{ms}$ )时剪切刚度虽发生明显退化,但仍表现为线性增长趋势。其中, $V_{cs}, V_{ms}, \Delta_{cs}, \Delta_{ms}$ 分别为 MCFT 计算获得的桥墩剪切实开裂及达到极限抗剪强度对应的荷载和剪切变形。

对各桥墩试件,首先基于 MCFT 计算其极限荷载  $V_{ms}$  和对应的剪切变形  $\Delta_{ms}$ ,然后建立试件的纤维梁柱单元模型,施加侧向荷载  $V_{ms}$  并计算对应的弯曲变形  $\Delta_{mf}$ ,同时基于纤维梁柱单元模型完成构件受力全过程分析,计算试件极限荷载  $V_{mf}$  及对应的弯曲变形  $\Delta_{uf}$ 。图 4 为纤维梁柱单元模型计算得到的试件  $V-\Delta_f$  关系曲线。

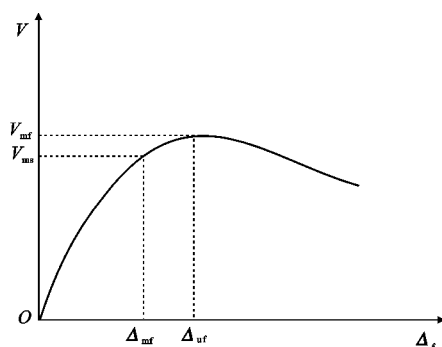


图 4 纤维梁柱单元模型计算的 RC 桥墩剪力-弯曲变形关系

Fig. 4 Shear Force-flexural Deformation Relationship of RC Bridge Pier Calculated by Fiber Beam-column Element Model

图 5 为不同破坏模式下 RC 桥墩在荷载  $V_{ms}$  下剪切变形  $\Delta_{ms}$  与弯曲变形  $\Delta_{mf}$  之比  $\xi$  的分布情况,可以看出,除个别试件外,不同破坏模式下比值  $\xi$  分布范围明显不同。弯曲破坏桥墩试件比值  $\xi$  基本在 0.01~0.2 之间,弯剪破坏桥墩试件基本在 0.2~1.5 之间,当比值  $\xi$  大于 1.5 时,试件基本发生剪切

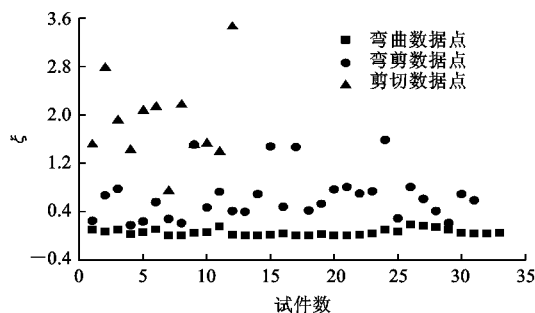


图 5 不同破坏模式下 RC 桥墩剪切与弯曲变形之比

Fig. 5 Shear to Flexural Deformation Ratio for RC Bridge Pier with Different Failure Modes

破坏。因此,可分别以剪切与弯曲变形的比值为 0.2 和 1.5 作为 RC 桥墩弯曲与弯剪破坏、弯剪与剪切破坏的判别标准。

需要说明的是,本文以极限荷载  $V_{ms}$  对应的剪切与弯曲变形的比值作为桥墩破坏模式的判别标准,而不是试件最终破坏时的变形量,主要原因是目前 MCFT 计算的桥墩剪力-剪切位移关系不能计算极限荷载后的剪切变形(图 3)。

## 2.2 桥墩承载力计算的准确性

分别基于纤维梁柱单元模型和 MCFT 完成了 RC 桥墩受力全过程的模拟分析,获得了纤维梁柱单元模型计算的桥墩极限荷载  $V_{mf}$  以及 MCFT 计算的桥墩极限荷载  $V_{ms}$ 。为验证不同模型计算的桥墩极限荷载的准确性,分别将各模型计算的 76 个桥墩极限荷载与试验极限荷载  $V_{te}$  进行对比分析,并对试件的破坏形态进行区分,结果如图 6,7 及表 1 所示。可以看出,无论是纤维梁柱单元模型还是 MCFT,对弯曲破坏桥墩极限荷载的计算均具有较好精度,计算的极限荷载与试验结果比值的平均值分别为 0.97 和 0.96。对于剪切破坏试件,纤维梁柱单元模型计算的极限荷载  $V_{mf}$  与试验结果  $V_{te}$  之比的平均值为 1.27,计算结果明显大于试验结果,这主要是由于发生了剪切破坏,试件并未达到极限抗弯能力,这符合对试件剪切破坏机理的认识。MCFT 计算的弯剪或剪切破坏试件的极限荷载  $V_{ms}$  总体上比试验结果  $V_{te}$  要低,计算结果与试验结果比值的平均值分别为 0.95 和 0.83,计算精度在可接受范围内。但需要注意,MCFT 计算的个别剪切破坏试件极限荷载与试验结果相差较大,二者之比仅为 0.61,这主要是由于试件剪跨比小、配箍率极低,呈显著的脆性剪切破坏形态,MCFT 应用于此类构件的极限荷载计算仍需进一步改进。

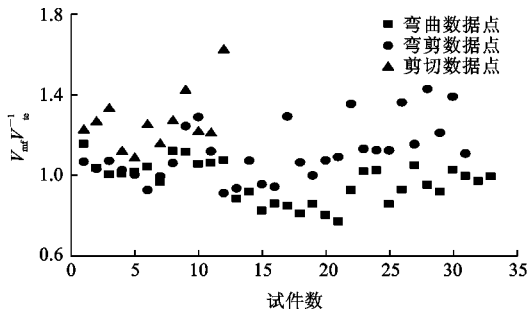


图 6 纤维梁柱单元模型计算的 RC 桥墩极限荷载与试验结果之比

Fig. 6 Ratios of Ultimate Loads of RC Bridge Pier Calculated by Fiber Beam-column Element Model to Test Results

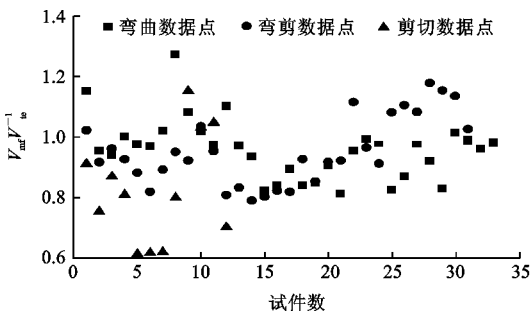


图 7 MCFT 计算的 RC 桥墩极限荷载与试验结果之比

Fig. 7 Ratios of Ultimate Loads of RC Bridge Pier Calculated by MCFT to Test Results

表 1 纤维梁柱单元模型和 MCFT 计算的 RC 桥墩极限荷载及与试验结果的对比

Tab. 1 Comparison of Ultimate Loads of RC Bridge Pier Calculated by Fiber Beam-column Element Model, MCFT and Test Results

参数	$V_{mf}V_{te}^{-1}$			$V_{ms}V_{te}^{-1}$		
	弯曲	弯剪	剪切	弯曲	弯剪	剪切
最大值	1.16	1.43	1.63	1.27	1.18	1.15
最小值	0.77	0.91	1.09	0.81	0.79	0.61
平均值	0.97	1.12	1.27	0.96	0.95	0.83

值得关注的是,无论对于何种破坏模式,纤维梁柱单元模型计算的桥墩极限荷载  $V_{mf}$  一般大于 MCFT 计算的极限荷载  $V_{ms}$ ,如图 8 所示, $V_{mf}$  与  $V_{ms}$  的比值一般均大于 1.0。

### 3 RC 桥墩弯剪数值分析的改进模型

在建立的 RC 桥墩弯剪破坏模式判别准则的基础上,提出了桥墩弯剪数值分析的改进模型,其建模过程如下:

(1)基于 MCFT 完成 RC 桥墩受力全过程分析,并计算桥墩从加载开始至极限荷载阶段的剪力-

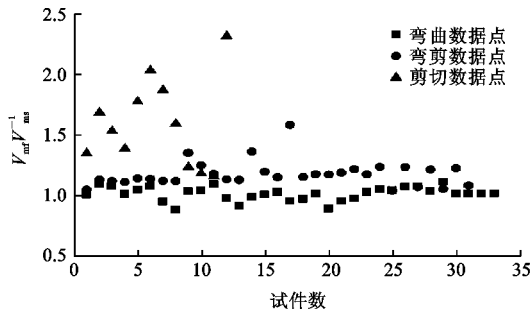


图 8 纤维梁柱单元模型与 MCFT 计算的 RC 桥墩极限荷载对比

Fig. 8 Comparison of Ultimate Loads of RC Bridge Pier Calculated by MCFT and Fiber Beam-column Element Model

剪切位移关系,得到试件的  $V_{ms}$  和对应的剪切变形  $\Delta_{ms}$ 。

(2)建立 RC 桥墩受力分析的纤维梁柱单元模型,施加侧向荷载  $V_{ms}$ ,计算荷载  $V_{ms}$  下的弯曲变形  $\Delta_{mf}$ ,完成试件受力全过程分析并得到桥墩的极限荷载  $V_{mf}$ 。

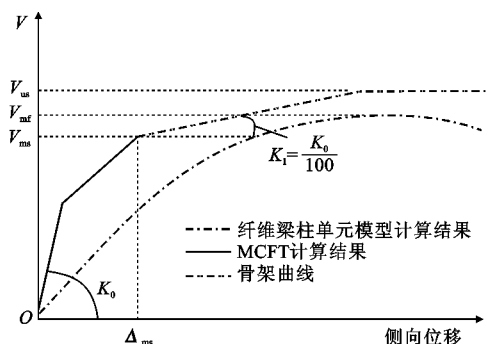
(3)计算  $\Delta_{ms}$  与  $\Delta_{mf}$  的比值  $\xi$ 。

根据  $\xi$  大小判断桥墩试件可能的破坏模式及剪力-剪切位移骨架曲线。各破坏模式下剪力-剪切位移骨架曲线自 0 点至  $(\Delta_{ms}, V_{ms})$  仍依据 MCFT 计算,并最终取为 4 折线形式,且达到极限荷载后作水平处理。但不同破坏模式下骨架曲线的极限荷载取值方法不同,图 9 为不同破坏模式下桥墩剪力-剪切位移骨架曲线选取方法。图 9 中同时给出了基于纤维梁柱单元模型计算的剪力-弯曲变形曲线,关于图 9 详细说明如下:

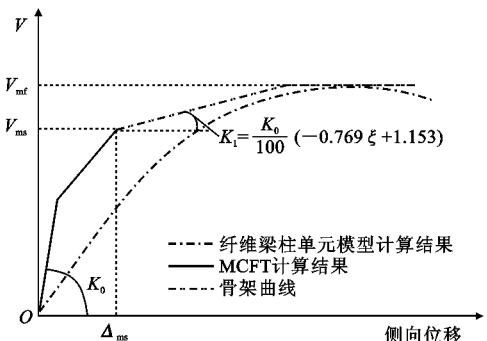
①当  $\xi < 0.2$  时,试件为弯曲破坏,将 MCFT 计算的剪力-剪切位移关系简化为双线性模式,极限荷载  $V_{ms}$  后的刚度取初始刚度  $K_0$  的 1/100,且保证剪力-剪切位移骨架曲线的极限荷载  $V_{us}$  大于纤维梁柱单元模型计算的极限荷载  $V_{mf}$ 。按此建模策略,桥墩模型可达到的最大侧向荷载为  $V_{mf}$ ,即试件反应由纤维梁柱单元控制,剪切弹簧单元无法达到极限荷载  $V_{us}$ 。桥墩以弯曲变形为主,剪切变形所占比例很小,具体建模策略如图 9(a)所示。

②当  $0.2 \leq \xi < 1.5$  时,试件为弯剪破坏,MCFT 计算的剪力-剪切位移关系简化为双线性模式,剪力-剪切位移骨架曲线的极限荷载由纤维梁柱单元模型计算的  $V_{mf}$  确定,MCFT 计算  $V_{ms}$  后的刚度  $K_1$  与初始刚度关系为

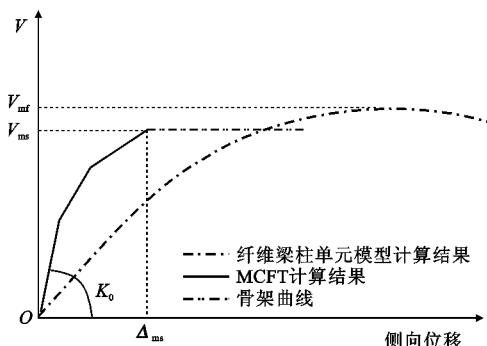
$$K_1 = \frac{K_0}{100} (-0.769\xi + 1.153) \quad (1)$$



(a) 弯曲破坏桥墩



(b) 弯剪破坏桥墩



(c) 剪切破坏桥墩

图 9 不同破坏模式下 RC 桥墩的剪力-剪切位移骨架曲线

Fig. 9 Shear Force-shear Displacement Skeleton Curves for RC Bridge Piers with Different Failure Modes

式(1)的物理意义在于,根据剪切与弯曲变形比值  $\xi$  的不同确定荷载  $V_{ms}$  后的刚度,以合理考虑弯曲与剪切变形间的耦合。当  $\xi=0.2$  时,  $K_1=K_0/100$ , 与弯曲破坏试件相同,当  $\xi=1.5$  时,  $K_1=0$ , 与剪切破坏试件相同,其间按线性差值考虑。按此建模策略,纤维梁柱单元与剪切弹簧单元都可达到极限荷载  $V_{mt}$ ,此时构件变形成分中弯曲与剪切所占比重取决于比值  $\xi$ ,即  $\xi$  值越大,  $K_1$  越小,最终模型中剪切变形所占比例越大,反之  $\xi$  值越小,剪切变形所占比例越小。具体建模策略如图 9(b)所示。

③当  $\xi \geq 1.5$  时,试件为剪切破坏模式,此时剪力-剪切位移骨架曲线直接按照 MCFT 确定,极限

荷载取为 MCFT 计算的极限荷载  $V_{ms}$ 。按此建模策略,由于  $V_{ms}$  小于  $V_{mt}$ ,纤维梁柱单元模型将达不到极限荷载,桥墩反应由剪切弹簧单元控制。此时构件变形将以剪切变形为主,弯曲变形所占比例较小,具体建模策略如图 9(c)所示。

再次强调,不同破坏模式下桥墩弯剪分析模型的差别主要体现在剪力-剪切位移骨架曲线极限荷载的取值不同,即弯曲、弯剪破坏试件的极限荷载由纤维梁柱单元模型计算,而剪切破坏试件由 MCFT 确定。同时,  $K_0$  根据 MCFT 计算的剪力-剪切位移关系的弹性段刚度计算。对  $K_1$  的取值,杨红等<sup>[3]</sup>直接建议取  $K_0/100$ ,本文中则根据试件不同的破坏形态进行了改进:对于弯曲破坏桥墩,直接取  $K_0/100$ ;对于剪切破坏桥墩,  $K_1$  取为 0;对于弯剪破坏桥墩,则根据剪切与弯曲变形的比值  $\xi$  进行线性插值。

## 4 模型验证

为验证本文模型的准确性,以 Ghee 等<sup>[25]</sup>完成的 22,23,24 号桥墩试件,司炳君等<sup>[24]</sup>完成的 A6 试件和 Ranzo 等<sup>[22]</sup>完成的 HS2, HS3 桥墩试件试验结果为依据,对以上各试件滞回曲线进行模拟并与试验结果进行对比。所有试验均为拟静力加载,其中,文献[22]中试件为圆形截面空心墩,其余均为圆形实心桥墩。从破坏形态来看,除 22 号桥墩发生剪切破坏外,其余均发生弯剪破坏。按本文模型计算得到的各试件滞回曲线与试验结果、纤维梁柱单元模型计算结果对比如图 10 所示,图 10 中同时给出了各试件的  $\xi$  值。

总体上看,弯剪数值分析的改进模型较好地模拟了各弯剪及剪切破坏桥墩试件的滞回曲线,试件极限荷载、加卸载刚度等均与试验结果吻合较好,验证了本文模型的准确性。数值模拟结果与试验结果仍存在一定的偏差,主要包括:①部分试件模拟的初始刚度大于试验结果,如图 10(b), (d) 所示;②模拟的试件捏拢效应仍与试验结果存在一定差异,如图 10(b), (c) 所示;③模拟得到的部分试件滞回曲线在加载后期与试验结果相差较大,如图 10(a), (c) 所示。造成偏差的主要原因有:①数值模型中未考虑纵筋在桥墩底座中拔出的影响,这会使模拟得到的滞回曲线初始刚度偏大,且捏拢效应不明显;②拟静力试验中,桥墩试件设计为倒 T 形,底座梁体会产生一定的变形,使试验中记录的墩顶位移增加、刚度减小,而数值模型中并未考虑底座梁体的变形;③剪力-剪切位移骨架曲线采用 4 折线形式,没有考虑随

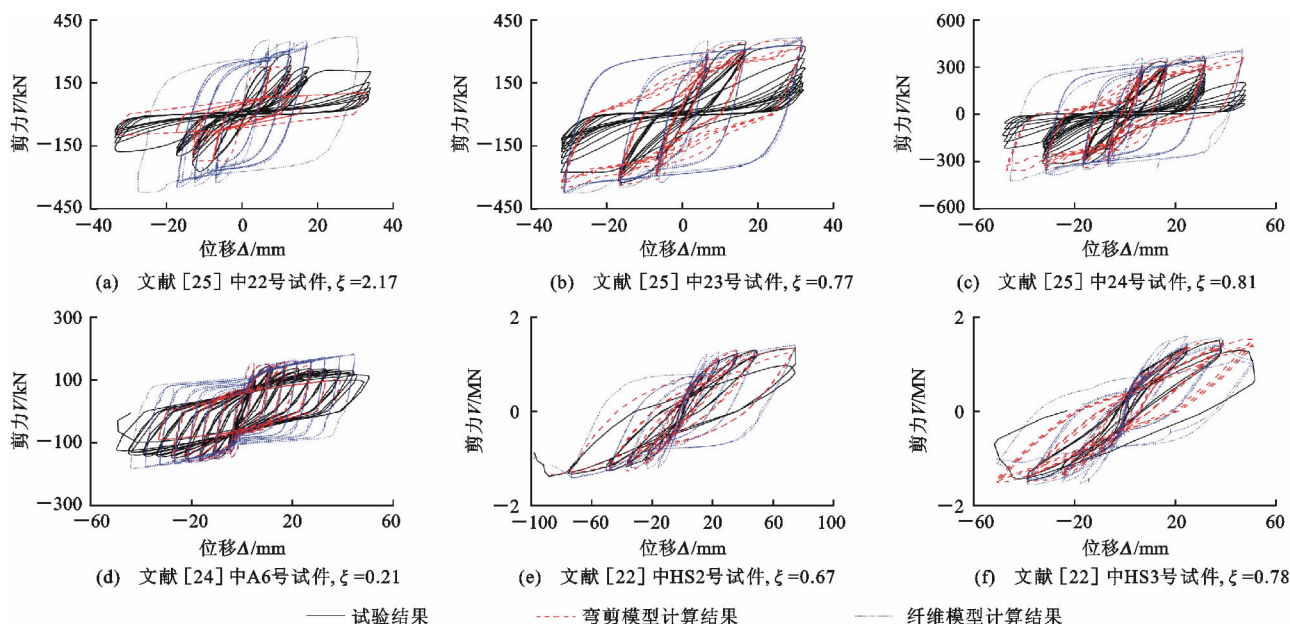


图 10 模拟滞回曲线与试验结果对比

Fig. 10 Comparison of Simulated and Tested Hysteretic Curves

剪切变形增加引起的抗剪强度退化,另外,滞回关系采用 Ozcebe 剪切滞回模型,在描述结构低周损伤时存在一定误差。

相比之下,纤维梁柱单元模型的模拟结果较差,主要体现在:①纤维梁柱单元模型模拟的滞回曲线饱满,残余位移远大于试验结果,这与剪切及弯剪破坏桥墩不符;②纤维梁柱单元模型模拟的桥墩初始刚度严重偏大。这也在一定程度上证明了本文模型模拟剪切及弯剪破坏 RC 桥墩试件的优势。

## 5 结语

(1)对于弯曲破坏的 RC 桥墩试件,极限荷载时试件剪切与弯曲变形的比值  $\xi < 0.2$ ;弯剪破坏试件  $0.2 \leq \xi < 1.5$ ;剪切破坏试件  $\xi \geq 1.5$ 。建议以剪切和弯曲变形比值为 0.2 和 1.5 时分别作为 RC 桥墩弯曲-弯剪-剪切破坏模式的判别标准。

(2)基于弯剪数值分析改进模型模拟得到的剪切和弯剪破坏桥墩滞回曲线与试验结果吻合较好,初步验证了改进模型的准确性。

(3)对于弯曲破坏 RC 桥墩,纤维梁柱单元模型和 MCFT 均可对试件极限荷载进行准确计算;对于剪切破坏桥墩,纤维梁柱单元模型计算的极限荷载明显大于试验结果。无论对于何种破坏模式,纤维梁柱单元模型计算的极限荷载一般均大于 MCFT 计算结果。

(4)本文对桥墩不同破坏模式下判别标准的确定

具有主观性,另外,桥墩弯剪数值分析的改进模型仅限于静力滞回性能的模拟。下一步应发展桥墩不同破坏模式下判别标准划分的理论依据,并结合实际地震动输入,对含矮墩桥梁的动力反应进行分析。

## 参考文献:

### References:

- [1] CERESA P, PETRINI L, PINHO R. Flexural-shear Beam-column Elements for Modeling Frame Structures Under Seismic Loading—State of the Art[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2007, 11(1): 46-88.
- [2] 蔡茂,顾祥林,华晶晶,等.考虑剪切作用的钢筋混凝土柱地震反应分析[J].建筑结构学报, 2011, 32(11): 97-108.  
CAI Mao, GU Xiang-lin, HUA Jing-jing, et al. Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Columns Considering Shear Effects[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 97-108.
- [3] 杨红,张睿,臧登科,等.纤维模型中非线性剪切效应的模拟方法及校核[J].四川大学学报:工程科学版, 2011, 43(1): 8-16.  
YANG Hong, ZHANG Rui, ZANG Deng-ke, et al. Fiber Model Based Nonlinear Shear Effect Modeling Method and Its Calibration[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(1): 8-16.
- [4] LEE D H, ELNASHAI A S. Seismic Analysis of RC

- Bridge Columns with Flexure-shear Interaction[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(5): 546-553.
- [5] LEE D H, CHOI E, ZI G. Evaluation of Earthquake Deformation and Performance for RC Bridge Piers [J]. Engineering Structures, 2005, 27(10): 1451-1464.
- [6] ELWOOD K J. Modelling Failures in Existing Reinforced Concrete Columns [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(5): 846-859.
- [7] SETZLER E J, SEZEN H. Model for the Lateral Behavior of Reinforced Concrete Columns Including Shear Deformations[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(2): 493-511.
- [8] SEZEN H, CHOWDHURY T. Hysteretic Model for Reinforced Concrete Columns Including the Effect of Shear and Axial Load Failure[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(2): 139-146.
- [9] XU S Y, ZHANG J. Hysteretic Shear-flexure Interaction Model of Reinforced Concrete Columns for Seismic Response Assessment of Bridges[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2011, 40(3): 315-337.
- [10] LODHI M S, SEZEN H. Estimation of Monotonic Behavior of Reinforced Concrete Columns Considering Shear-flexure-axial Load Interaction[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41(15): 2159-2175.
- [11] GHANNOUM W M, MOEHLE J P. Rotation-based Shear Failure Model for Lightly Confined RC Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(10): 1267-1278.
- [12] 孙治国, 王东升, 李宏男, 等. 钢筋混凝土桥墩弯剪数值分析模型[J]. 计算力学学报, 2013, 30(2): 249-254.
- SUN Zhi-guo, WANG Dong-sheng, LI Hong-nan, et al. Flexural-shear Analysis Model for Reinforced Concrete Bridge Piers[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(2): 249-254.
- [13] 雷拓, 钱江, 刘伯权. 考虑非线性剪切效应的钢筋混凝土柱模型化方法及应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(4): 13-19.
- LEI Tuo, QIAN Jiang, LIU Bo-quan. Modeling and Its Application of Reinforced Concrete Columns Considering Nonlinear Shear Effects[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(4): 13-19.
- [14] SEZEN H, MOEHLE J P. Shear Strength Model for Lightly Reinforced Concrete Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(11): 1692-1703.
- [15] BENTZ E C, VECCHIO F J, COLLINS M P. Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements [J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(4): 614-624.
- [16] OZCEBE G, SAATCIOGLU M. Hysteretic Shear Model for Reinforced Concrete Members[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(1): 132-148.
- [17] MARTINEZ-RUEDA J E, ELNASHAI A S. Confined Concrete Model Under Cyclic Load[J]. Materials and Structures, 1997, 30(3): 139-147.
- [18] FARIA R, POUCA N V, DELGADO R. Simulation of the Cyclic Behavior of R/C Rectangular Hollow Section Bridge Piers via a Detailed Numerical Model [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2004, 8(5): 725-748.
- [19] 王东升, 司炳君, 孙治国, 等. 地震作用下钢筋混凝土桥墩塑性铰区抗剪强度试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 34-41.
- WANG Dong-sheng, SI Bing-jun, SUN Zhi-guo, et al. Experiment on Shear Strength of Reinforced Concrete Bridge Column in Plastic Hinge Zone Under Seismic Effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 34-41.
- [20] 刘鸣, 陆本燕, 刘伯权. 钢筋混凝土桥墩破坏模式识别方法[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3): 58-63, 79.
- LIU Ming, LU Ben-yan, LIU Bo-quan. Failure Mode Identification Method of Reinforced Concrete Bridge Pier[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(3): 58-63, 79.
- [21] 孙治国, 王东升, 郭迅, 等. 地震作用下 RC 薄壁空心墩抗剪强度比较研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(12): 81-89.
- SUN Zhi-guo, WANG Dong-sheng, GUO Xun, et al. Comparative Study on Shear Strength of RC Thin-walled Hollow Bridge Piers Under Seismic Effect[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(12): 81-89.
- [22] RANZO G, PRIESTLEY M J N. Seismic Performance of Large RC Circular Hollow Columns [C]// New Zealand Earthquake Commission. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Silverstream: New Zealand Earthquake Commission, 2000: 1-8.
- [23] ZAHN F A. Design of Reinforced Concrete Bridge Columns for Strength and Ductility [D]. Christchurch: University of Canterbury, 1985.
- [24] 司炳君, 孙治国, 杜修力, 等. 钢筋混凝土桥墩地震弯



- 剪破坏机理与震后快速修复技术研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 90-99.
- SI Bing-jun, SUN Zhi-guo, DU Xiu-li, et al. Study on the Seismic Flexural-shear Damage Mechanisms and Rapid Repair Techniques for Earthquake Damaged Bridge Piers[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7): 90-99.
- [25] GHEE A B, PRIESTLEY M J N, PAULAY T. Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns[J]. ACI Structural Journal, 1989, 86(1): 45-59.
- [26] LEHMAN D, MOEHLE J, MAHIN S, et al. Experimental Evaluation of the Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(6): 869-879.
- [27] 李贵乾. 钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究及数值分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- LI Gui-qian. Experimental Study and Numerical Analysis on Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Columns[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [28] 孙治国, 司炳君, 王东升, 等. 高强箍筋高强混凝土柱抗震性能研究[J]. 工程力学, 2010, 27(5): 128-136.
- SUN Zhi-guo, SI Bing-jun, WANG Dong-sheng, et al. Research on the Seismic Performance of High-strength Concrete Columns with High-strength Stirrups[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(5): 128-136.
- [29] 孙治国, 司炳君, 郭 迅, 等. 钢筋混凝土柱地震剪切-粘结破坏试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 109-117, 149.
- SUN Zhi-guo, SI Bing-jun, GUO Xun, et al. Experimental Research on the Shear-bond Failure of RC Columns Under Seismic Action[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 109-117, 149.
- [30] TANAKA H. Effect of Lateral Confining Reinforcement on the Ductile Behavior of Reinforced Concrete Columns[D]. Christchurch: University of Canterbury, 1990.
- [31] ABOUTAHA R S, ENGELHARDT M D, JIRSA J O, et al. Rehabilitation of Shear Critical Concrete Columns by Use of Rectangular Steel Jackets[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(1): 68-78.
- [32] GILL W D. Ductility of Rectangular Reinforced Concrete Columns with Axial Load[D]. Christchurch: University of Canterbury, 1979.
- [33] WATSON S, PARK R. Simulated Seismic Load Tests on Reinforced Concrete Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(6): 1825-1849.
- 
- (上接第 41 页)
- texture and Civil Engineering, 2009, 26(1): 49-54.
- [11] 伍雪南, 徐 为, 孙 勇, 等. 考虑粘结滑移的锈蚀钢筋混凝土梁数值模拟研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(增1): 126-129.
- WU Xue-nan, XU Wei, SUN Yong, et al. Experimental Study on Property of RC Concrete Beams Corroded by NaCl[J]. Industrial Construction, 2012, 42(S1): 126-129.
- [12] 张伟平, 张 誉. 锈胀开裂后钢筋混凝土粘结滑移本构关系研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 40-44.
- ZHANG Wei-ping, ZHANG Yu. Bond-slip Relationship Between Corroded Steel Bars and Concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 40-44.
- [13] 张克波, 张建仁, 王 磊. 锈蚀对钢筋强度影响试验研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(12): 59-66.
- ZHANG Ke-bo, ZHANG Jian-ren, WANG Lei. Experimental Study on Effect of Corrosion on Reinforcement Strength[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(12): 59-66.
- [14] 瞿伟廉, 王 仪. 考虑钢筋锈蚀的 RC 梁承载力的非线性有限元分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(6): 73-75.
- QU Wei-lian, WANG Yi. Investigation on Force-bearing Capacity of Corroded Reinforced Concrete Beam by Using Nonlinear Finite Element Analysis[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(6): 73-75.
- [15] 徐 港, 费红芳, 刘德富, 等. 混凝土中钢筋锈蚀深度预测模型[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(6): 844-849.
- XU Gang, FEI Hong-fang, LIU De-fu, et al. Prediction Model on the Rebar Corrosion Depth in Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(6): 844-849.